

# ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

## Εισαγωγή

Σ' αυτό το κεφάλαιο μελετάται η αλληλεπίδραση των μαγνητών, περιγράφεται το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από ρευματοφόρους αγωγούς και η αλληλεπίδραση μεταξύ ρευματοφόρων αγωγών. Επίσης εξηγείται γιατί ορισμένα υλικά παρουσιάζουν μαγνητικές ιδιότητες.

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η **κατανόηση** των μαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται από ρευματοφόρους αγωγούς, του τρόπου μαγνήτισης των υλικών και της αλληλεπίδρασης μαγνητικού πεδίου με κινούμενα ηλεκτρικά φορτία.

## 6-1. Μαγνήτες

Ορισμένα ορυκτά οξειδίων του σιδήρου ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) έχουν την ιδιότητα να έλκουν ρινίσματα σιδήρου. Τα υλικά αυτά αρχικά ανακαλύφθηκαν στη Μαγνησία της Μ. Ασίας και γι' αυτό ονομάστηκαν *μαγνήτες* οι δε ιδιότητες τους μαγνητικές ιδιότητες.

Όταν ένας ραβδόμορφος μαγνήτης βυθιστεί σε ρινίσματα σιδήρου προσκολλούνται σ' αυτόν ρινίσματα. Τα ρινίσματα συγκεντρώνονται στα δύο άκρα του μαγνήτη που ονομάζονται *μαγνητικοί πόλοι*, ενώ στο μέσο του μαγνήτη, που ονομάζεται *ουδέτερη ζώνη* δεν παρατηρείται προσκόλληση ρινισμάτων. Ένας ελαφρύς ραβδόμορφος μαγνήτης ονομάζεται και *μαγνητική βελόνη*. Έχει παρατηρηθεί πως μια μαγνητική βελόνη, που είναι εξαρτημένη από νήμα, παίρνει πάντοτε σταθερή διεύθυνση ώστε το ένα άκρο της να δείχνει κοντά στο γεωγραφικό Βόρειο πόλο της γης, ενώ το άλλο κοντά στο Νότιο γεωγραφικό πόλο της γης.

Μεταξύ δύο μαγνητών ασκούνται δυνάμεις και μάλιστα οι ομώνυμοι πόλοι απωθούνται, ενώ οι ετερόνυμοι έλκονται.

Όπως αποδείχτηκε πειραματικά, οι δυνάμεις με τις οποίες αλληλεπιδρούν δύο μαγνητικοί πόλοι έχουν:

- α) Μέτρο: Αντιστρόφως ανάλογο προς το τετράγωνο της απόστασής τους.
- β) Διεύθυνση: Την ευθεία που ορίζεται από τους δύο πόλους.

Παρότι οι μαγνητικές δυνάμεις έχουν πολλές ομοιότητες με τις ηλεκτρικές δυνάμεις, εντούτοις παρουσιάζουν μια σημαντική διαφορά. Το θετικό ηλεκτρικό φορτίο μπορεί να διαχωριστεί από το αρνητικό, ενώ οι μαγνητικοί πόλοι δεν μπορούν να διαχωριστούν. Όσες φορές και αν τμηθεί ένας ραβδόμορφος μαγνήτης πάντοτε στα άκρα του εμφανίζονται δύο ετερόνυμοι πόλοι δηλ. οι μαγνητικοί πόλοι **πάντοτε εμφανίζονται κατά ζεύγη**. Όλες οι προσπάθειες, που έγιναν μέχρι σήμερα για να απομονωθεί μαγνητικό "μονόπολο" απέτυχαν.

Άξιο προσοχής είναι, ότι ένας μαγνήτης αλληλεπιδρά και με κινούμενα ηλεκτρικά φορτία, όπως εύκολα διαπιστώνεται από την εκτροπή ηλεκτρικών φορτίων, τα οποία διέρχονται από σημεία που βρίσκονται κοντά σε μαγνήτες.

Μαγνητικές ιδιότητες παρουσιάζουν και οι ρευματοφόροι αγωγοί, οι οποίοι ασκούν δυνάμεις σε φυσικούς μαγνήτες.

## 6-2. Μαγνητικό πεδίο

Κάθε μαγνήτης δέχεται την επίδραση δύναμης αν ευρεθεί σε κάποιο σημείο του χώρου γύρω από έναν άλλο μαγνήτη ή ρευματοφόρο αγωγό. Δύναμη επίσης ασκείται και σε οποιοδήποτε φορτίο κινείται σε σημεία τα οποία βρίσκονται σε περιοχές του χώρου που υπάρχουν μαγνήτες ή ρευματοφόροι αγωγοί. Οι περιοχές του χώρου με τις παραπάνω ιδιότητες ονομάζονται μαγνητικά πεδία. Δηλαδή:

□ Μαγνητικό πεδίο ονομάζεται κάθε περιοχή του χώρου εφόσον, ασκείται δύναμη σε κάθε μαγνήτη ή κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο, το οποίο θα βρίσκεται σε οποιοδήποτε σημείο της.

## 6-3. Ένταση μαγνητικού πεδίου

Όπως το ηλεκτρικό πεδίο έτσι και το μαγνητικό πεδίο περιγράφεται με τη βοήθεια ενός διανυσματικού μεγέθους, δηλαδή την *ένταση μαγνητικού πεδίου*. Η ένταση μαγνητικού πεδίο σε ένα σημείο του περιγράφει το πόσο ισχυρό είναι το πεδίο στο συγκεκριμένο σημείο καθώς και τα χαρακτηριστικά της δύναμης, η οποία θα ασκηθεί σε κάποιο μαγνήτη ή κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο, το οποίο θα βρεθεί στο σημείο.

Για τον ορισμό της έντασης χρησιμοποιείται ως υπόθεμα κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο εφόσον δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαγνήτης, αφού μαγνητικό "μονόπολο" δεν έχει απομονωθεί. Έχει αποδειχτεί πειραματικά, πως η δύναμη, η οποία ασκείται σε σωματίδιο με ηλεκτρικό φορτίο που κινείται σε μαγνητικό πεδίο, έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Το μέτρο της δύναμης είναι ανάλογο του φορτίου  $q$  και του μέτρου της ταχύτητας του σωματιδίου. Εξαρτάται επίσης από τη διεύθυνση της ταχύτητας.
2. Υπάρχει μία διεύθυνση της ταχύτητας του σωματιδίου κατά την οποία η μαγνητική δύναμη είναι μηδέν.
3. Για μία άλλη διεύθυνση της ταχύτητας του σωματιδίου, η οποία είναι κάθετη στην προηγούμενη, το μέτρο της δύναμης παίρνει τη μέγιστη τιμή του και δίνεται από τη σχέση:

$$F_{\max} = B v q \quad (6.1)$$

Όπου  $v$  το μέτρο της ταχύτητας του σωματιδίου,  $q$  το φορτίο του και  $B$  ο συντελεστής αναλογίας.

4. Η δύναμη είναι πάντοτε κάθετη στην ταχύτητα.
5. Η δύναμη, που ασκείται σε θετικό φορτίο, είναι ίσου μεγέθους και αντίθετη από τη δύναμη που ασκείται σε αρνητικό φορτίο το οποίο έχει ίδια ταχύτητα.

Με βάση τα παραπάνω η ένταση μαγνητικού πεδίου σε σημείο  $A$  του πεδίου ορίζεται ως εξής:

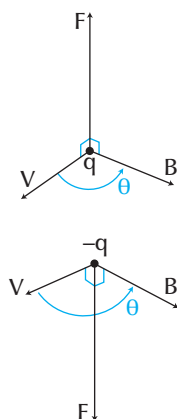
Στο σημείο  $A$  βάλλεται σωματίδιο, που φέρει θετικό φορτίο  $q$ , με ταχύτητα η οποία έχει κάθε φορά το ίδιο μέτρο αλλά διαφορετική διεύθυνση. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο  $A$ , έχει διεύθυνση τη διεύθυνση της ταχύτητας για την οποία η δύναμη που ασκείται στο σωματίδιο είναι μηδέν. Φορά τέτοια ώστε, η κατεύθυνση της μέγιστης δύναμης, η κατεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η κατεύθυνση της ταχύτητας για την οποία η δύναμη είναι μέγιστη να αποτελούν δεξιόστροφο σύστημα αξόνων. Μέτρο που δίνεται από τη σχέση:

$$B = \frac{F_{\max}}{v q} \quad (6.2)$$

□ Η δύναμη που ασκείται σε κινούμενο φορτίο μέσα σε μαγνητικό πεδίο ονομάζεται και *δύναμη Lorentz*.

Η δύναμη Lorentz είναι πάντοτε κάθετη στην ταχύτητα και την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Στη γενική περίπτωση, που η ταχύτητα του σωματιδίου σχηματίζει γωνία  $\theta$  με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, το μέτρο της δύναμης Lorents δίνεται από τη σχέση:

$$F = B v q \cdot \eta \mu \theta \quad (6.3)$$



**Σχήμα 6.1.** Η δύναμη Lorentz σε κινούμενο φορτισμένο σωματίο

Η φορά της δύναμης Lorentz είναι τέτοια, ώστε η κατεύθυνση της δύναμης, η κατεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η κατεύθυνση της ταχύτητας (αν το φορτίο είναι θετικό) ή η αντίθετη κατεύθυνση (αν το φορτίο είναι αρνητικό), να αποτελούν δεξιόστροφο σύστημα αξόνων.

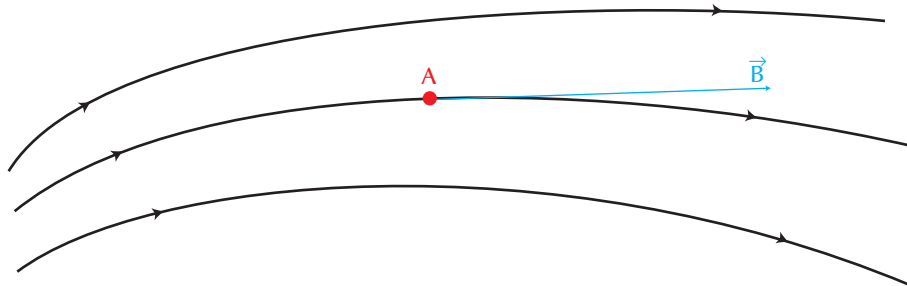
Η μονάδα της έντασης μαγνητικού πεδίου στο S.I είναι το 1Tesla (1T). Ο ορισμός του Tesla, θα δοθεί σε επόμενη παράγραφο.

## 6-4. Δυναμικές γραμμές μαγνητικού πεδίου

Όπως στο ηλεκτρικό πεδίο, έτσι και στο μαγνητικό η εμποπτεία υποβοηθείται με τη χρήση των δυναμικών γραμμών.

□ Δυναμική γραμμή μαγνητικού πεδίου ονομάζεται η νοητή γραμμή που σε κάθε σημείο της η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι εφαπτομένη.

Οι δυναμικές γραμμές δεν τέμνονται, η φορά τους συμπίπτει με την φορά της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η πυκνότητά τους είναι ανάλογη με το πόσο ισχυρό είναι το πεδίο στη συγκεκριμένη περιοχή



Σχήμα 6.2. Δυναμικές γραμμές μαγνητικού πεδίου

## 6-5. Ομογενές μαγνητικό πεδίο

Στα μαγνητικά πεδία, η ένταση είναι διαφορετική (κατά διεύθυνση, φορά και μέτρο) από σημείο σε σημείο. Υπάρχουν όμως μαγνητικά πεδία, στα οποία η ένταση είναι η ίδια σε κάθε σημείο τους, τα πεδία αυτά ονομάζονται **ομογενή μαγνητικά πεδία**.

Πειραματικά, ομογενές μαγνητικό πεδίο δημιουργείται στο εσωτερικό ρευματοφόρου σωληνοειδούς (σχ. 6.6)

## 6-6. Μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού απείρου μήκους

Ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός θεωρείται απείρου μήκους, όταν η απόσταση  $r$  σημείου Α, στο οποίο πρόκειται να προσδιορισθεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου, είναι ασήμαντη σε σχέση με το μήκος του αγωγού.

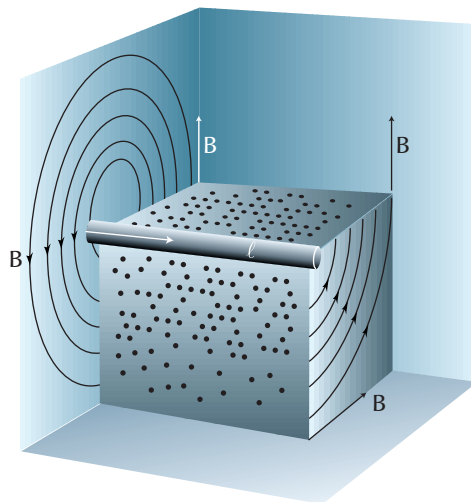
Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου έχουν μορφή ομοκέντρων κύκλων, που το επίπεδο τους είναι κάθετο στον αγωγό και τα κέντρα τους βρίσκονται στον αγωγό.

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου, σε σημείο Α που απέχει κατά  $r$  από τον αγωγό, έχει:

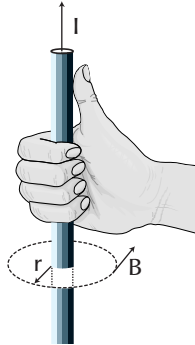
- Διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο, που ορίζεται από τον αγωγό και το σημείο Α.
- Φορά τέτοια ώστε, η ένταση του Μ.Π, η απόσταση  $r$  και η φορά του ρεύματος να αποτελούν δεξιόστροφο σύστημα αξόνων.
- Μέτρο που δίνεται από τη σχέση:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2 \pi r} \quad (6.4)$$

όπου  $I$  η ένταση του ρεύματος και  $r$  η απόσταση του σημείου Α από τον αγωγό. Η σταθερά  $\mu_0$  ονομάζεται μαγνητική διαπερατότητα του κενού και έχει τιμή  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$ .



**Σχήμα 6.3.** Μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρου αγωγού απείρου μήκους



**Σχήμα 6.4.** Προσδιορισμός της φοράς της έντασης του μαγνητικού πεδίου ευθυγράμμου ρευματοφόρου αγωγού

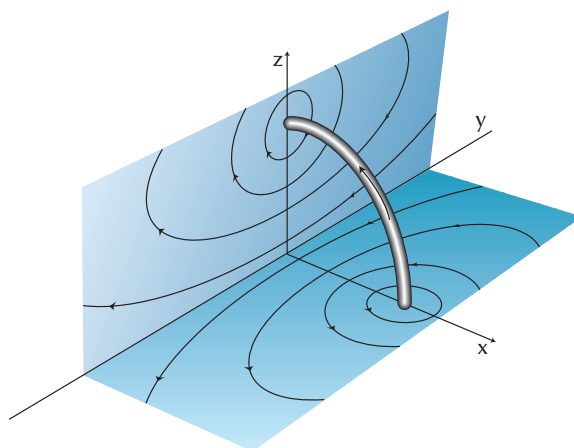
## 6-7. Μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρου κυκλικού αγωγού

Το μαγνητικό πεδίο, που δημιουργείται από έναν κυκλικό ρευματοφόρο αγωγό είναι ανομοιογενές. Η ένταση  $\vec{B}$  του πεδίου στο κέντρο του αγωγού έχει:

- Διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο του κυκλικού αγωγού.
- Φορά, την φορά με την οποία προχωράει δεξιόστροφος κοχλίας (βίδα), όταν στρέφεται κατά τη φορά του ρεύματος.
- Μέτρο που δίνεται από τη σχέση:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (6.5)$$

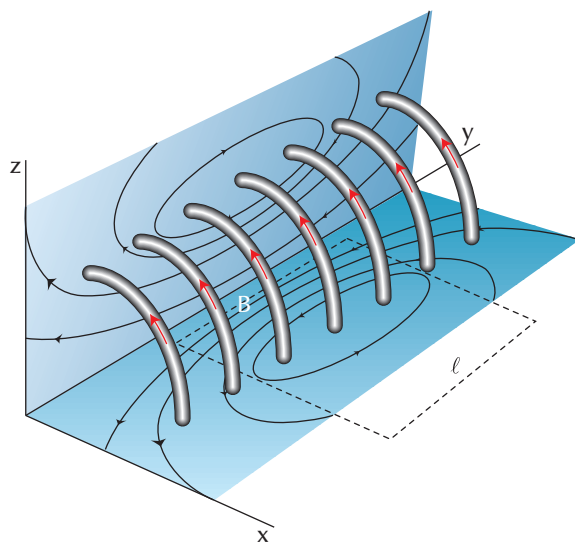
όπου  $I$  η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον κυκλικό αγωγό και  $R$  η ακτίνα του.



**Σχήμα 6.5.** Μαγνητικό πεδίο κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού

## 6-8. Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς

Ένα πηνίο θεωρείται απείρου μήκους όταν το μήκος του είναι πολύ μεγαλύτερο από τη διάμετρο των σπειρών του.



**Σχήμα 6.6.** Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς

Στο εσωτερικό πηνίου απείρου μήκους, που διαρρέεται από ρεύμα, το μαγνητικό πεδίο είναι ομογενές. Στο πραγματικό πηνίο, το Μ.Π είναι ομογενές στα σημεία που βρίσκονται σε κάποια απόσταση από τα άκρα του πηνίου. Οι δυναμικές γραμμές είναι παράλληλες προς τον άξονα του πηνίου.

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου έχει:

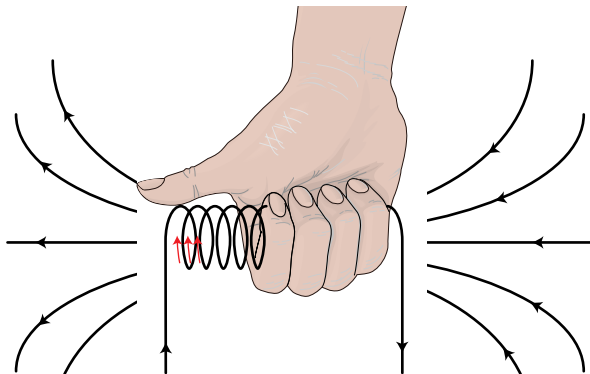
- Διεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα του σωληνοειδούς.
- Φορά, την φορά που προχωράει δεξιόστροφος κοχλίας, ο οποίος είναι τοποθετημένος κατά μήκος του άξονα του σωληνοειδούς και στρέφεται κατά τη φορά του ρεύματος.
- Μέτρο που δίνεται από τη σχέση:

$$B = \mu_0 I \frac{n}{\ell} \quad (6.6)$$

όπου  $n$ : αριθμός σπειρών

$\ell$ : μήκος σωληνοειδούς





**Σχήμα 6.7.** Προσδιορισμός της φοράς της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό ρευματοφόρου σωληνοειδούς

Η φορά της έντασης του μαγνητικού πεδίου μπορεί να προσδιορισθεί και ως εξής:

Το δεξί χέρι σφίγγει το σωληνοειδές με τέτοιο τρόπο ώστε τα νύχια να δείχνουν τη φορά του ρεύματος, ο τεντωμένος αντίχειρας δείχνει τη φορά του μαγνητικού πεδίου.

## 6-9. Μαγνητική ροπή

Κάθε βρόχος ρεύματος, όταν βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο, προσανατολίζεται όπως ένας ραβδόμορφος μαγνήτης. Ο τρόπος, που προσανατολίζεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο ένας ρευματοφόρος βρόχος, καθορίζεται από τη μαγνητική ροπή.

Ως μαγνητική ροπή επίπεδου βρόχου ορίζεται το διανυσματικό μέγεθος που έχει:

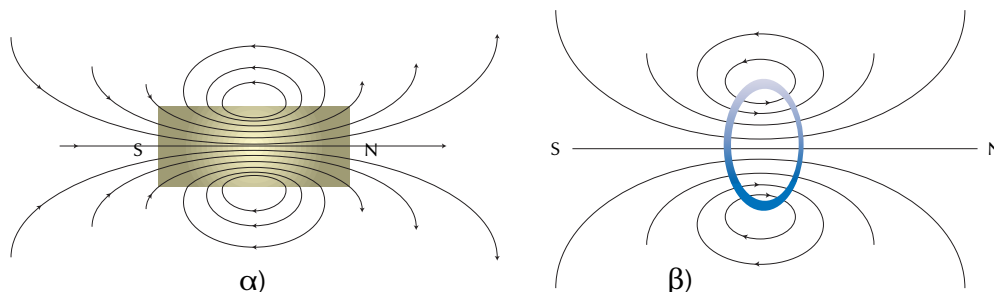
α) Διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο του βρόχου.

β) Φορά, τη φορά που προχωράει δεξιόστροφος κοχλίας, που είναι κάθετος στο επίπεδο του βρόχου και στρέφεται κατά τη φορά του ρεύματος.

γ) Μέτρο που δίνεται από τη σχέση:

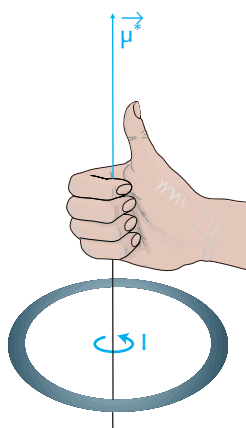
$$\mu^* = IS \quad (6.7)$$

όπου  $I$  η ένταση του ρεύματος και  $S$  το εμβαδόν της επιφάνειας που περικλείεται από τον βρόχο.



**Σχήμα 6.8.** (α) Μαγνητικό πεδίο ραβδόμορφου μαγνήτη. (β) Μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρο βρόχου. Η ομοιότητα είναι προφανής

Ένας ρευματοφόρος βρόχος, όταν βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, προσανατολίζεται, ώστε η μαγνητική ροπή να είναι παράλληλη προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου.



**Σχήμα 6.9.** Μαγνητική ροπή ρευματοφόρου βρόχου

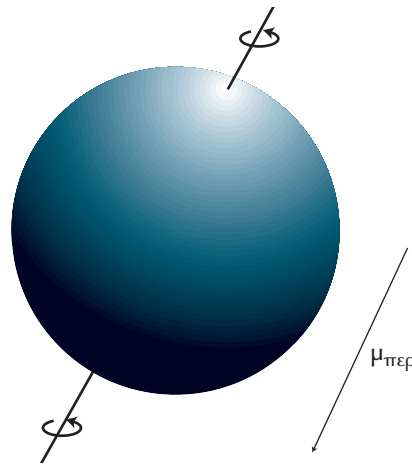
Η μονάδα μαγνητικής ροπής στο S.I είναι το  $1\text{Am}^2$ .

## 6-10. Μαγνητισμός και ύλη

Η απάντηση, στο ερώτημα γιατί ορισμένα υλικά εμφανίζουν μαγνητικές ιδιότητες ενώ άλλα δεν εμφανίζουν, βρίσκεται στη δομή των ατόμων των συγκεκριμένων υλικών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα άτομα αποτελούνται από τον πυρήνα γύρο από τον οποίο περιστρέφονται ηλεκτρόνια. Κάθε ηλεκτρόνιο που περιστρέφεται ισодυναμεί με βρόχο ηλεκτρικού ρεύματος, επομένως έχει μαγνητική ροπή. Οι μα-

γνητικές ροπές των ηλεκτρονίων που περιστρέφονται γύρω από ένα άτομο, επειδή έχουν διάφορους προσανατολισμούς, αλληλοαναιρούνται, με αποτέλεσμα συνολικά το άτομο να μην έχει μαγνητική ροπή ή να έχει ασήμαντη.



**Σχήμα 6.10.** Μαγνητική ροπή ηλεκτρονίου λόγω ιδιοπεριστροφής

Τα ηλεκτρόνια, όμως εκτός από την περιστροφική κίνηση που εκτελούν γύρω από τον πυρήνα, περιστρέφονται και γύρω από τον εαυτό τους (spin). Λόγω της ίδιας περιστροφής το ηλεκτρόνιο έχει μία επιπλέον μαγνητική ροπή. Αν ο αριθμός των ηλεκτρονίων του ατόμου είναι άρτιος, η συνολική μαγνητική ροπή των ηλεκτρονίων που οφείλεται στην ιδιοπεριστροφή τους, είναι μηδέν, επειδή σε ένα άτομο οι μαγνητικές **ροπές των ηλεκτρονίων είναι ανά δύο αντίθετες**. Όταν ο αριθμός των ηλεκτρονίων είναι περιτός, τότε η συνολική μαγνητική ροπή είναι διάφορη του μηδενός και ίση με τη μαγνητική ροπή του μονήρους ηλεκτρονίου.

Η συνολική μαγνητική ροπή ενός ατόμου, εφόσον υπάρχει, οφείλεται κύρια στην ιδιοπεριστροφή των ηλεκτρονίων.

Η παρουσία ορισμένων υλικών επηρεάζει την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Για παράδειγμα, αν η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό ρευματοφόρου σωληνοειδούς, είναι  $B_0$  όταν στο εσωτερικό υπάρχει κενό, όταν τοποθετηθεί ως πυρήνας κάποιο υλικό, τότε η ένταση του μαγνητικού πεδίου αλλάζει και παίρνει άλλη τιμή  $B$ .

□ Μαγνητική διαπερατότητα ενός υλικού ονομάζεται το πηλίκο της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό ρευματοφόρου σωληνοειδούς, όταν στο εσωτερικό του υπάρχει το υλικό, προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του ίδιου σωληνοειδούς, όταν στο εσωτερικό του υπάρχει κενό.

$$\mu = \frac{B}{B_0} \quad (6.8)$$

Η μαγνητική διαπερατότητα είναι αδιάστατο μέγεθος, δηλαδή καθαρός «αριθμός».

Τα υλικά στα οποία  $\mu > 1$  ονομάζονται *σιδηρομαγνητικά*, εκείνα στα οποία  $\mu > 1$  *παραμαγνητικά* και εκείνα στα οποία  $\mu < 1$  *διαμαγνητικά*.

## 6-11. Σιδηρομαγνητικά υλικά

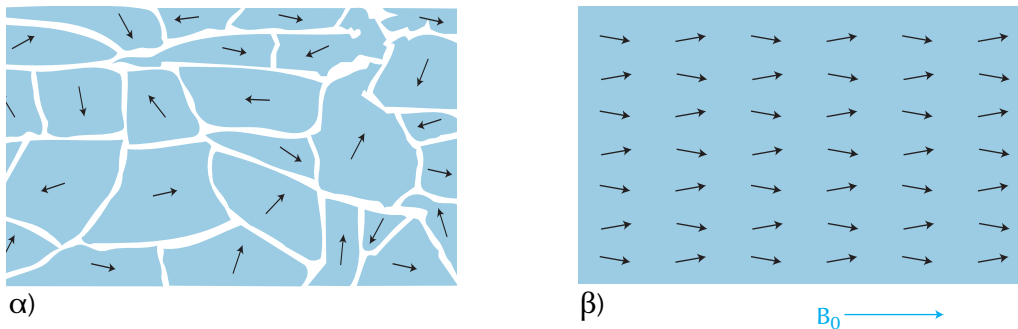
Τα σιδηρομαγνητικά υλικά παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον γιατί χρησιμοποιούνται ως πυρήνες πηνίων και μετασχηματιστών. Επίσης χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μονίμων μαγνητών. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά αποτελούνται από άτομα που έχουν μαγνητική ροπή. Οι μαγνητικές ροπές των ατόμων των σιδηρομαγνητικών υλικών αποκτούν παρόμοιο προσανατολισμό ακόμη και με την επίδραση ασθενών εξωτερικών μαγνητικών πεδίων, τον οποίο διατηρούν και μετά την απομάκρυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. **Στον προσανατολισμό των μαγνητικών ροπών, που παραμένει, οφείλεται η μόνιμη μαγνήτιση των σιδηρομαγνητικών υλικών.**

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά υπάρχουν περιοχές στις οποίες οι μαγνητικές ροπές των ατόμων έχουν τον ίδιο προσανατολισμό. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται *περιοχές Weiss*. Οι περιοχές Weiss έχουν όγκους περίπου  $10^{-12}$  έως  $10^{-8} \text{ m}^3$  και περιέχουν  $10^{17}$  έως  $10^{21}$  άτομα.

Όταν δεν υπάρχει εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, οι μαγνητικές ροπές των περιοχών Weiss έχουν τυχαίο προσανατολισμό στο χώρο και γι' αυτό το υλικό δεν έχει μαγνητικές ιδιότητες. Με την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου έντασης  $B_0$ , οι μαγνητικές ροπές των περιοχών Weiss αρχίζουν να προσανατολίζονται κατά την διεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και το υλικό αποκτά μαγνητικές ιδιότητες. Μέσα στο υλικό η ολική ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ίση με το άθροισμα της έντασης του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και του μαγνητικού πεδίου που προκύπτει από τον προσανατολισμό των μαγνητικών ροπών των περιοχών Weiss. δηλ.

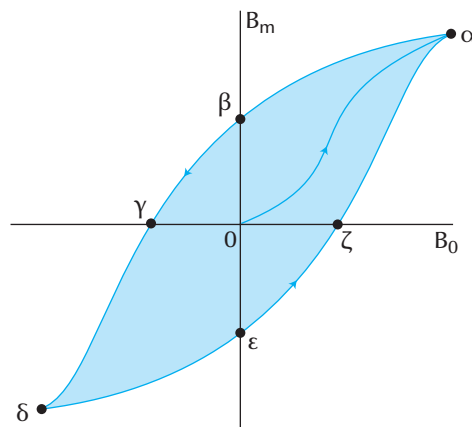
$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m \quad (6.9)$$

όπου  $\vec{B}$  η ένταση του συνολικού μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του υλικού,  $\vec{B}_0$  η ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και  $\vec{B}_m$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου που οφείλεται στις περιοχές Weiss.



**Σχήμα 6.11.** α) Περιοχές Weiss β) Περιοχές Weiss, όταν υπάρχει εξωτερικό μαγνητικό πεδίο

Ο τρόπος μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού φαίνεται παραστατικά στο διάγραμμα του βρόγχου υστερήσεως (Σχ. 6.12).



**Σχήμα 6.12.** Βρόχος υστερήσεως σιδηρομαγνητικού υλικού

Το υλικό αρχικά δεν έχει μαγνήτιση (σημείο Ο του διαγράμματος). Με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου οι μαγνητικές ροπές των περιοχών Weiss αρχίζουν να προσανατολίζονται με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μαγνητικό πεδίο έντασης  $B_m$  που οφείλεται στο υλικό. Καθώς η  $B_0$  αυξάνει, αυξάνει και η  $B_m$  μέχρι του σημείου α, όπου επέρχεται και κόρος περαιτέρω δηλαδή αύξηση του  $B_0$  δεν επιφέρει αντίστοιχη αύξηση του  $B_m$ . Αυτό συμβαίνει γιατί στο α υπάρχει πλήρης προσανατολισμός των μαγνητικών περιοχών Weiss.

Ακολουθώντας, μειώνουμε την τιμή του  $B_0$ . Αυτό προκαλεί αντίστοιχη μείωση της  $B_m$ , όταν όμως η  $B_0$  μηδενίζεται (σημείο β), η  $B_m$  είναι διάφορη του μηδενός. Σε αυτό ακριβώς το φαινόμενο οφείλεται η παραμένουσα μαγνήτιση των σιδηρομαγνητικών υλικών. Ακολουθώντας αλλάζουμε τη φορά του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και αυξάνουμε σταδιακά την έντασή του· αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της τιμής του  $B_m$  αφού οι μαγνητικές ροπές των μαγνητικών περιοχών τείνουν να προσανατολισθούν κατά την αντίθετη φορά. Στο σημείο γ ο προσανατολισμός των μαγνητικών ροπών είναι τυχαίος και επομένως  $B_m=0$ . Η περαιτέρω αύξηση της τιμής  $B_0$  κατά την αρνητική φορά προκαλεί αύξηση της  $B_m$  κατά την ίδια φορά έως το σημείο δ, όπου εμφανίζεται πάλι κόρος.

## 6-12. Δύναμη Laplace

Όταν ένας ρευματοφόρος αγωγός βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο δέχεται την επίδραση δύναμης, η οποία ονομάζεται δύναμη Laplace. Η δύναμη Laplace αποτελεί τη συνιστάμενη των δυνάμεων που ασκεί το μαγνητικό πεδίο στους κινούμενους ηλεκτρικούς φορείς που συνιστούν το ρεύμα. Παρότι η δύναμη Laplace ασκείται σε ρευματοφόρο αγωγό οποιουδήποτε σχήματος, ο οποίος βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, θα μελετηθεί η ειδική περίπτωση, που ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο. Αν ο αγωγός έχει μήκος  $\ell$ , διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I$  και σχηματίζει με τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου γωνία  $\theta$ , τότε η δύναμη Laplace, που ασκείται στον αγωγό έχει:

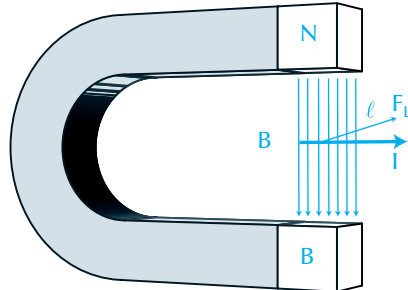
α) Διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο που ορίζεται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου και τον αγωγό.

β) Φορά τέτοια ώστε, η κατεύθυνση της δύναμης, η κατεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η συμβατική φορά του ρεύματος να αποτελούν δεξιόστροφο σύστημα αξόνων.

γ) Μέτρο που δίνεται από τη σχέση:

$$F_L = B I \ell \cdot \eta \mu \theta \quad (6.10)$$

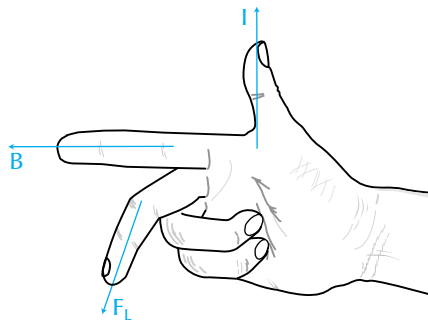
όπου  $B$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου.



**Σχήμα 6.13.** Δύναμη Laplace σε ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό

Όπως προκύπτει από τη σχέση (6.10), όταν ο αγωγός είναι παράλληλος προς τις δυναμικές γραμμές ( $\theta=0^\circ$ ) η δύναμη Laplace είναι  $F_L = B I \ell \cdot \eta\mu 0 = B I \ell \cdot 0 = 0$ . Όταν ο αγωγός είναι κάθετος στις δυναμικές γραμμές ( $\theta=90^\circ$ ) η δύναμη Laplace έχει μέτρο  $F_L = B I \ell \eta\mu 90^\circ \Rightarrow$

$$F_L = B I \ell \quad (6.11)$$



**Σχήμα 6.14.** Προσδιορισμός της φοράς της δύναμης Laplace. Το δεξί χέρι αναπαριστά δεξιόστροφο σύστημα αξόνων

## 6-13. Μαγνητική ροή

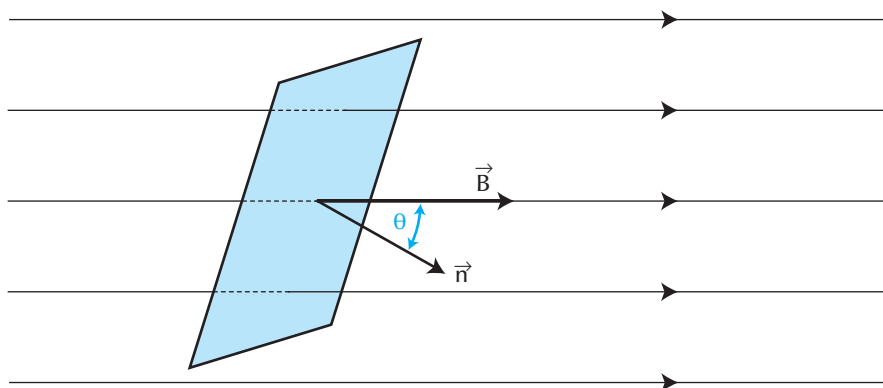
Στο σχήμα 6.13 φαίνεται μία νοητή επίπεδη επιφάνεια  $S$ , μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο.

□ Ορίζεται ως μαγνητική ροή, η οποία διέρχεται από επιφάνεια  $S$  το γινόμενο της έντασης του μαγνητικού πεδίου, επί το εμβαδόν της επιφάνειας, επί το συνημίτονο της γωνίας που σχηματίζεται από την κάθετη στην επιφάνεια και την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

$$\Phi = B S \sin\theta$$

(6.12)

Η μαγνητική ροή μπορεί να ορισθεί γενικότερα σε ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο, αλλά για λόγους απλούστευσης προτιμήθηκε να δοθεί ο ορισμός της για ομογενές μαγνητικό πεδίο, χωρίς σημαντική καταστρατήγηση της γενικότητας.



**Σχήμα 6.15.** Μαγνητική ροή που διέρχεται από επίπεδη επιφάνεια

Η μονάδα της μαγνητικής ροής, στο S.I είναι το 1Wb (1 Webber). Ο ορισμός του 1Wb θα δοθεί σε επόμενη παράγραφο. Από το 1Wb ορίζεται το 1 Tesla ως:  $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb} \cdot \text{m}^2$ .

## 6-14. Μαγνητική επαγωγή

Στις προηγούμενες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου μελετήθηκε, πως δημιουργείται μαγνητικό πεδίο από κινούμενα φορτία. Στις επόμενες παραγράφους θα μελετηθεί πως ένα μαγνητικό πεδίο μπορεί να δημιουργήσει ένα ηλεκτρικό πεδίο.

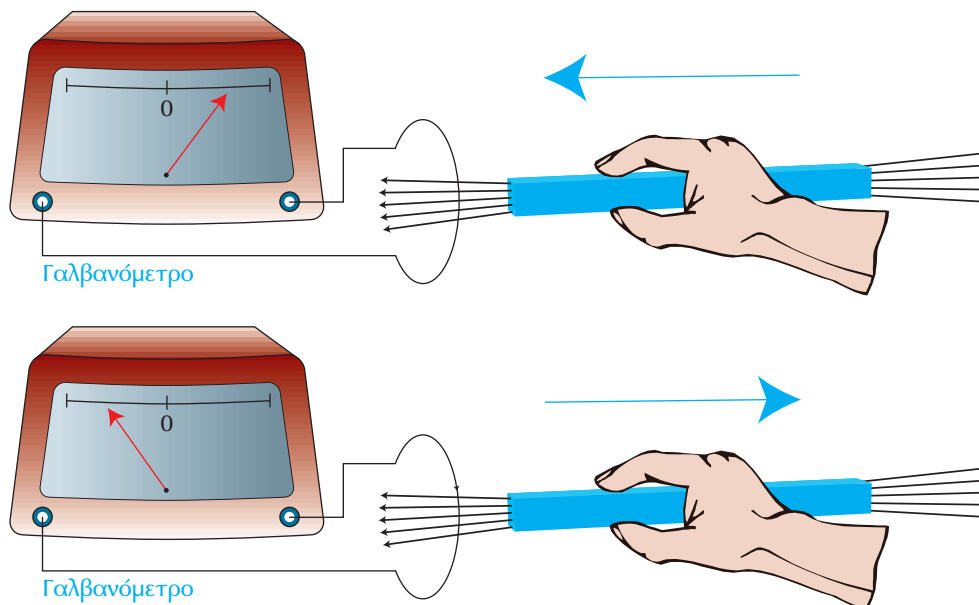
Ο Άγγλος Michael Faraday και ο Αμερικανός Joseph Henry, εργαζόμενοι ανεξάρτητα, έδειξαν πειραματικά πως ένα μαγνητικό πεδίο επάγει ρεύμα σε ένα κύκλωμα.

Ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να δημιουργηθεί από μαγνητικό πεδίο με δύο τρόπους,

- α) Με την κίνηση ενός αγωγού μέσα σε χρονικά σταθερό μαγνητικό πεδίο,
- β) Με τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου από χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

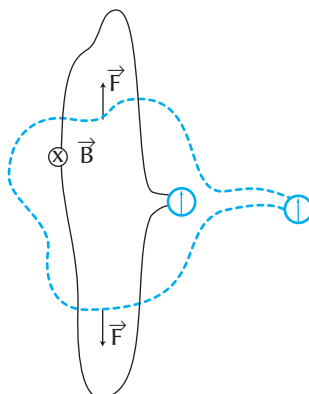


Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω θα περιγραφούν τρία πειράματα στα οποία φαίνεται η δημιουργία ρεύματος από μαγνητικό πεδίο.



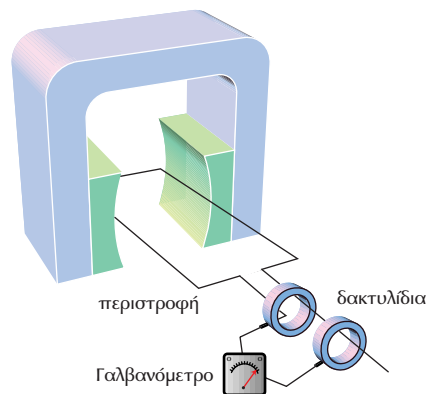
**Σχήμα 6.16.** Όταν ο μαγνήτης κινείται προς τον βρόγχο ή απομακρύνεται από αυτόν το γαλβανόμετρο αποκλίνει σε αντίθετες κατευθύνσεις

Στο σχήμα 6.16 φαίνεται συρμάτινος βρόγχος, ο οποίος είναι συνδεδεμένος σε γαλβανόμετρο. Το γαλβανόμετρο αρχικά έχει ένδειξη μηδέν. Όταν ένας μαγνήτης κινείται προς τον βρόγχο, η βελόνη του γαλβανόμετρου αποκλίνει, που σημαίνει ότι ο βρόγχος διαρρέεται από ρεύμα. Η απόκλιση της βελόνης υπάρχει μόνο όταν κινείται ο μαγνήτης. Όταν ο μαγνήτης απομακρύνεται από τον βρόγχο η βελόνη αποκλίνει πάλι αλλά σε αντίθετη κατεύθυνση.



**Σχήμα 6.17.** Ο βρόγχος διαρρέεται από ρεύμα καθώς παραμορφώνεται

Στο σχήμα 6.17 ο επίπεδος συρμάτινος βρόχος είναι συνδεδεμένος με γαλβανόμετρο. Ο βρόχος βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, του οποίου η ένταση είναι κάθετη στο επίπεδο του βρόγχου. Ο βρόχος σταδιακά παραμορφώνεται έως ότου το εμβαδόν του γίνει μηδέν. Όσο διαρκεί η παραμόρφωση του βρόχου η βελόνη του γαλβανόμετρου αποκλίνει, που σημαίνει ότι ο βρόχος διαρρέεται από ρεύμα.



**Σχήμα 6.18.** Το συρμάτινο πλαίσιο, καθώς περιστρέφεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο διαρρέεται από ρεύμα

Στο σχήμα 6.18 συρμάτινο πλαίσιο στρέφεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο. Όσο το πλαίσιο περιστρέφεται, η βελόνη του γαλβανόμετρου αποκλίνει, άρα το πλαίσιο διαρρέεται από ρεύμα.

Τί κοινό σημείο υπάρχει στα παραπάνω πειράματα; Ο Faraday διαπίστωσε πως το επαγωγικό ρεύμα υπάρχει εφόσον μεταβάλλεται η μαγνητική ροή. Συγκεκριμένα στο πρώτο πείραμα, καθώς ο μαγνήτης πλησιάζει στον συρμάτινο δακτύλιο, μεταβάλλεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου η οποία υπάρχει στα σημεία της επιφάνειας του δακτυλίου. Σύμφωνα με τη σχέση (6.12) μεταβάλλεται και η μαγνητική ροή που περνά από τον δακτύλιο. Στο δεύτερο πείραμα καθώς παραμορφώνεται ο συρμάτινος βρόχος, μεταβάλλεται το εμβαδόν της επιφάνειας του, άρα μεταβάλλεται και η μαγνητική ροή. Στο τρίτο πείραμα, επειδή το πλαίσιο περιστρέφεται μεταβάλλεται και η γωνία  $\theta$ , που σχηματίζεται από την κάθετη στο πλαίσιο και την ένταση του μαγνητικού πεδίου, επομένως μεταβάλλεται και η μαγνητική ροή. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Συγκεκριμένα:

□ Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή ονομάζεται το φαινόμενο κατά το

οποίο εμφανίζεται ηλεκτρεγερτική δύναμη, όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή.

## 6-15. Νόμος Faraday

Ο Faraday κατάφερε πρώτος να διαπιστώσει πειραματικά, από ποιους παράγοντες εξαρτάται η τιμή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (επαγωγικής τάσης). Σύμφωνα με το νόμο Faraday:

□ Η επαγωγική ηλεκτρεγερτική δύναμη, που αναπτύσσεται σ' ένα κύκλωμα είναι ανάλογη προς το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής, που περνάει από το κύκλωμα.

$$E_{\text{επ}} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (6.13)$$

Η επαγωγική ηλεκτρεγερτική δύναμη, που επάγεται σε πηνίο, το οποίο έχει  $n$  σπείρες είναι:

$$E_{\text{επ}} = - n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (6.14)$$

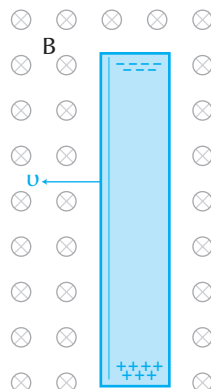
Το μείον στις σχέσεις (6.13) και (6.14) οφείλεται στον κανόνα του Lenz., σύμφωνα με τον οποίο το επαγωγικό ρεύμα έχει τέτοια φορά, ώστε να αντιδρά στα αίτια, που το προκαλούν.

Από τη σχέση (6.13) ορίζεται ως μονάδα της μαγνητικής ροής το 1Webber.  $1\text{Wb} = 1\text{V} \cdot \text{s}$

## 6-16. Κίνηση ευθύγραμμου αγωγού σε μαγνητικό πεδίο

Επαγωγική ηλεκτρεγερτική δύναμη εμφανίζεται σε κάθε αγωγό, που κινείται σε μαγνητικό πεδίο. Όπως φαίνεται στο σχήμα (6.19), ευθύγραμμος αγωγός μήκους  $l$ , κινείται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης  $\vec{B}$ , με ταχύτητα  $\vec{v}$  κάθετη στην ένταση του μαγνητικού πεδίου και τον αγωγό. Στον αγωγό εμφανίζεται επαγωγική ηλεκτρεγερτική δύναμη, που δίνεται από τη σχέση:

$$E = B v l \quad (6.15)$$



**Σχήμα 6.19.** Αγωγός που κινείται σε μαγνητικό πεδίο εμφανίζει επαγωγική τάση

Στην περίπτωση που η ταχύτητα του αγωγού σχηματίζει γωνία  $\theta$  με τις δυναμικές γραμμές του πεδίου η επαγωγική τάση δίνεται από τη σχέση:

$$E = B v \ell \eta \mu \theta \quad (6.16)$$

## 6-17. Εφαρμογές

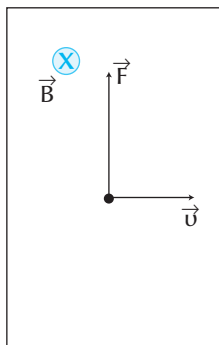
### Εφαρμογή 1η

Σωματίο φέρει φορτίο  $q=2\text{mC}$  και κινείται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης  $B=2\text{T}$  με σταθερή ταχύτητα κάθετη στις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Στο σωματίο ασκείται από το πεδίο δύναμη  $F = 4 \cdot 10^{-3} \text{ N}$ .

- Να σχεδιασθεί η δύναμη  $F$ .
- Να υπολογισθεί το μέτρο της ταχύτητας του σωματιδίου.

### Λύση

α) Η δύναμη είναι κάθετη στην ταχύτητα και την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Η φορά της προσδιορίζεται από τον κανόνα της δεξιάς χειρός (Σχ.6-1), στο δάκτυλο που αντιστοιχεί στο  $I$ , αντιστοιχηθεί η κατεύθυνση της ταχύτητας. Συνήθως τα σχήματα κατασκευάζονται διδιάστατα. Σε αυτή την περίπτωση κάθε διάνυσμα, που είναι κάθετο στο επίπεδο σχεδίασης, παριστάνεται σαν μικρός κύκλος. Αν η φορά του είναι προς τον αναγνώστη τότε τοποθετείται στον κύκλο τελεία, αν είναι αντίθετη τοποθετείτε ένα  $\times$ .



β) Η σχέση που δίνει τη δύναμη Lorentz είναι:

$$F = B u q \Rightarrow u = \frac{F}{B q} \Rightarrow u = \frac{4 \cdot 10^{-3} \text{ N}}{2 \text{ T } 2 \cdot 10^{-3} \text{ C}} \Rightarrow u = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

### Εφαρμογή 2η

Ευθύγραμμος αγωγός διαρρέεται από ρεύμα  $I=2\text{A}$ . Σε σημείο Α του μαγνητικού πεδίου του αγωγού η ένταση είναι  $B = 4 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ . Πόσο απέχει το Α από τον αγωγό; Δίνεται  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$ .

### Λύση

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο Α δίνεται από τη σχέση:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \Rightarrow r = \frac{\mu_0 I}{2\pi B} \Rightarrow r = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 2\text{A}}{2\pi 4 \cdot 10^{-5} \text{ T}} \Rightarrow r = 10^{-2} \text{ m}.$$

### Εφαρμογή 3η

Στο κέντρο ρευματοφόρου κυκλικού αγωγού ακτίνας  $r=0,1\text{m}$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι  $B = 4\pi 10^{-6} \text{ T}$ . Ο αγωγός έχει αντίσταση  $R=10\Omega$ . Να υπολογισθούν:

α) Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.

β) Η τάση που εφαρμόζεται στον αγωγό.

$$\text{Δίνεται } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}.$$

### Λύση

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο του αγωγού είναι:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r} \Rightarrow I = \frac{B 2r}{\mu_0} \Rightarrow I = \frac{4\pi 10^{-6} \text{T} \cdot 2 \cdot 0,1 \text{m}}{4\pi 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}} \Rightarrow I = 2 \text{A}.$$

Η τάση θα είναι:

$$V = IR \Rightarrow V = 2 \text{A} \cdot 10 \Omega = 20 \text{V}.$$

### Εφαρμογή 4η

Στα άκρα πηνίου υπάρχει τάση  $V=10\text{V}$ . Το πηνίο έχει μήκος  $l=2,5\text{cm}$ , και  $n=100$  σπείρες. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πηνίου είναι  $B = 4\pi 10^{-5} \text{T}$ . Να υπολογισθεί η αντίσταση του πηνίου.

$$\text{Δίνεται } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}.$$

### Λύση

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πηνίου δίνεται από τη σχέση:

$$B = \mu_0 I \frac{n}{l} \Rightarrow I = \frac{B l}{\mu_0 n} \quad I = \frac{4 \pi 10^{-5} \text{T} 2,5 \cdot 10^{-2} \text{m}}{4 \pi 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} 100} = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{A}$$

Η αντίσταση του πηνίου είναι:

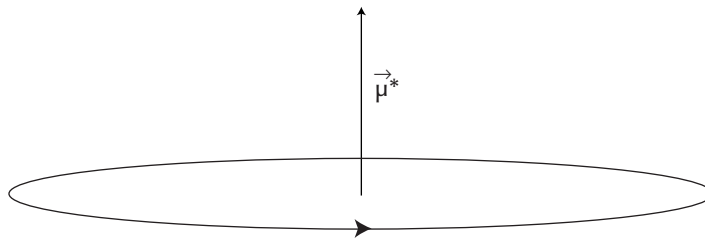
$$R = \frac{V}{I} \Rightarrow R = \frac{10 \text{V}}{2,5 \cdot 10^{-2} \text{A}} = 400 \Omega.$$

### Εφαρμογή 5η

Κυκλική συρμάτινη σπείρα έχει ακτίνα  $\alpha=0,1\text{m}$  και διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I=0,1\pi\text{ A}$ . α) Να σχεδιασθεί η μαγνητική ροπή της σπείρας. β) Να υπολογισθεί το μέτρο της μαγνητικής ροπής.

#### Λύση

α) Η μαγνητική ροπή έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της σπείρας και φορά τη φορά που προχωράει δεξιόστροφος κοχλίας κάθετος στο επίπεδο της σπείρας, ο οποίος στρέφεται όπως το ρεύμα.



β) Το μέτρο της μαγνητικής ροπής δίνεται από τη σχέση:

$$\mu^* = I \cdot S \quad (1)$$

Το εμβαδόν κύκλου, όπως είναι γνωστό, σε συνάρτηση με την ακτίνα είναι:

$$S = \pi\alpha^2 \quad (2)$$

Από τις σχέσεις (1) και (2) συνεπάγεται:

$$\mu^* = I \cdot \pi\alpha^2 = 0,1\pi\text{A} \cdot \pi \cdot 0,1^2\text{m}^2 = 0,01\text{Am}^2$$

### Εφαρμογή 6η

Ευθύγραμμος αγωγός διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I = 2\text{A}$  και είναι τοπο-

θετημένος μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης  $B=2\text{T}$  κάθετα στις δυναμικές γραμμές. Στον αγωγό ασκείται δύναμη  $F=2\text{N}$  από το πεδίο. Ποιο είναι το μήκος του αγωγού;

### Λύση

Ο αγωγός μέσα στο μαγνητικό πεδίο δέχεται την επίδραση δύναμης Laplace, της οποίας το μέτρο είναι:

$$F = B I \ell \Rightarrow \ell = \frac{F}{BI} \Rightarrow \ell = \frac{2\text{N}}{2\text{T} \cdot 2\text{A}} = 0,5\text{m}.$$

### Εφαρμογή 7η

Εύκαμπτο σύρμα έχει τη μορφή επιπέδου βρόχου, βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης  $B=2\text{T}$  με το επίπεδο του κάθετο στις δυναμικές γραμμές. Το σύρμα παραμορφώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η επιφάνεια του να μεταβάλλεται με σταθερό ρυθμό. Αρχικά το εμβαδόν του είναι  $S_1=0,3\text{m}^2$  και σε χρόνο  $\Delta t=2\text{s}$  γίνεται  $S_2=0,1\text{m}^2$ . Πόση είναι η επαγωγική ηλεκτρεγερτική δύναμη που εμφανίζεται;

### Λύση

Η επαγωγική τάση δίνεται από τη σχέση:

$$E = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

Η μεταβολή της μαγνητικής ροής είναι:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 \\ \Phi_2 = BS_2 \\ \Phi_1 = BS_1 \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta\Phi = BS_2 - BS_1 \Rightarrow \Delta\Phi = B(S_2 - S_1) \quad (2)$$

$$\text{Από τις σχέσεις (1) και (2)} \Rightarrow E = - \frac{B(S_2 - S_1)}{\Delta t} \Rightarrow$$

$$E = - \frac{2\text{T}(0,1\text{m}^2 - 0,3\text{m}^2)}{2\text{s}} = 20\mu\text{V}$$



### Εφαρμογή 8η

Αγωγός μήκους  $\ell=1\text{m}$ , βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης  $B=2\text{T}$ . Ο αγωγός είναι κάθετος στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου και κινείται με σταθερή ταχύτητα, η οποία είναι κάθετη στις δυναμικές γραμμές. Στα άκρα του αγωγού εμφανίζεται τάση  $V=2\text{V}$ . Ποιο είναι το μέτρο της ταχύτητας του;

### Λύση

Η επαγωγική τάση που εμφανίζεται στα άκρα του αγωγού είναι:

$$V = B u \ell \Rightarrow u = \frac{V}{B \ell} \Rightarrow = \frac{2\text{V}}{2\text{T} \cdot 1\text{m}} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

## 6-18. Προβλήματα προς λύση

**1<sup>ο</sup>** Σωματίο, έχει  $q=-10\text{mC}$  και κινείται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με σταθερή ταχύτητα  $u = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , η οποία σχηματίζει γωνία  $\theta=30^\circ$  με τις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Το σωματίδιο δέχεται δύναμη  $F=0,01\text{N}$  από το πεδίο.

α) Να σχεδιασθεί η δύναμη Laplace που δέχεται το σωματίο.

β) Να υπολογισθεί το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

(0,2T)

**2<sup>ο</sup>** Σωματίδιο κινείται με ταχύτητα  $u = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης  $B=0,1\text{T}$ , κάθετα στις δυναμικές γραμμές. Η δύναμη που δέχεται το σωματίο είναι  $F=0,02\text{N}$ . Πόσο φορτίο φέρει το σωματίδιο;

(0,04C)

**3<sup>ο</sup>** Δύο ευθύγραμμοι παράλληλοι αγωγοί Α και Β, διαρρέονται από ρεύματα εντάσεων  $I_1=1\text{A}$  και  $I_2=2\text{A}$  αντίστοιχα. Η απόσταση των αγωγών είναι  $r=2\text{m}$ . Να υπολογισθεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου σε σημείο Ν, το

οποίο βρίσκεται ανάμεσα στους αγωγούς και απέχει  $d=1,6\text{m}$  από τον Α. Δίνεται  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$ .

- α) Όταν τα ρεύματα που διαρρέουν τους αγωγούς είναι ομόρροπα.  
β) Όταν είναι αντίρροπα.

$$(8,75 \cdot 10^{-7} \text{ T}, 1,125 \cdot 10^{-6} \text{ T})$$

- 4<sup>ο</sup>** Δύο ευθύγραμμοι αγωγοί Α και Β απέχουν κατά  $r=0,5\text{m}$  και διαρρέονται από ομόρροπα ρεύματα εντάσεων  $I_1=3\text{A}$  και  $I_2=12\text{A}$ . Να ευρεθεί η απόσταση σημείου Ν από τον αγωγό Α στον οποίο η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι μηδέν.

$$(0,1\text{m})$$

- 5<sup>ο</sup>** Κυκλικός αγωγός διαρρέεται από ρεύμα  $I=2\text{A}$ , οπότε στο κέντρο του η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι  $B=0,04\text{mT}$ . Ποιο είναι το εμβαδόν του αγωγού;

$$(10^{-4}\pi^3 \text{ m}^2)$$

- 6<sup>ο</sup>** Δύο συρμάτινοι ομοεπίπεδοι ομόκεντροι κυκλικοί αγωγοί έχουν ακτίνες  $r_1=10\text{cm}$  και  $r_2=5\text{cm}$  αντίστοιχα. Οι αγωγοί διαρρέονται από ομόρροπα ρεύματα εντάσεων  $I_1=2\text{A}$  και  $I_2=5\text{A}$ . Να υπολογισθεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο των δακτυλίων.

$$(2,4 \cdot 10^{-5} \pi \text{ T})$$

- 7<sup>ο</sup>** Πηνίο έχει  $n=100$  σπείρες και μήκος  $\ell=2,5\text{cm}$ . Το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I=0,1\text{A}$ , οπότε η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πηνίου είναι  $B=0,16\pi\text{T}$ . Έχει το πηνίο πυρήνα; Αν έχει, πόση είναι η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο πυρήνας;

$$(1000)$$

- 8<sup>ο</sup>** Με πόση τάση πρέπει να τροφοδοτηθεί πηνίο, το οποίο έχει  $10 \frac{\sigma\pi}{\text{cm}}$ , ώστε στο εσωτερικό του να δημιουργηθεί μαγνητικό πεδίο με ένταση  $B=0,1\text{T}$ ; Αν στο εσωτερικό του πηνίου τοποθετηθεί πυρήνας με μαγνητική διαπερατότητα  $\mu=1000$ , ποια πρέπει να είναι η τάση τροφοδοσίας,

ώστε η ένταση του μαγνητικού πεδίου να παραμείνει η ίδια; Η αντίσταση του πηνίου είναι  $R=100\Omega$ .

$$\left(\frac{25000}{\pi} \text{ V}, \frac{25}{\pi} \text{ V}\right)$$

- 9<sup>ο</sup>** Πηνίο από χάλκινο σύρμα έχει  $n=1000$  σπείρες, μήκος  $\ell=1\text{m}$  και τροφοδοτείται από τάση  $V=10\text{V}$ . Η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πηνίου είναι  $B=0,1\text{T}$ . Το χάλκινο σύρμα από το οποίο είναι κατασκευασμένο το πηνίο έχει αντίσταση  $R^*=0,01 \frac{\Omega}{\text{m}}$ . Ποιο είναι το μήκος του χάλκινου σύρματος;

(4m)

- 10<sup>ο</sup>** Τετράγωνο συρμάτινο πλαίσιο διαρρέεται από ρεύμα  $I=2\text{A}$ , οπότε αποκτά μαγνητική ροπή  $\mu^*=2\text{Am}^2$ . Να υπολογισθεί το μήκος της πλευράς του πλαισίου.

(1m)

- 11<sup>ο</sup>** Ορθογώνιο συρμάτινο πλαίσιο με διαστάσεις  $\alpha=0,1\text{m}$  και  $\beta=0,2\text{m}$ , πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως μαγνητικό δίπολο με μαγνητική ροπή  $\mu^*=4\text{Am}^2$ . Το σύρμα από το οποίο είναι κατασκευασμένο το πλαίσιο έχει αντίσταση ανά μονάδα μήκους  $R^*=1 \frac{\Omega}{\text{m}}$ . Με πόση τάση πρέπει να τροφοδοτηθεί το πλαίσιο;

(2.4V)

- 12<sup>ο</sup>** Τετράγωνος συρμάτινος αγωγός με πλευρά  $\alpha=0,1\text{m}$  βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης  $B_1=2\text{T}$ , με το επίπεδο του κάθετο στις δυναμικές γραμμές. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου ελαττώνεται με σταθερό ρυθμό και σε χρόνο  $\Delta t=10^{-3}\text{s}$  μηδενίζεται. Να υπολογισθεί η επαγωγική τάση που εμφανίζεται στο πηνίο.

(20V)

- 13<sup>ο</sup>** Στο εσωτερικό σωληνοειδούς βρίσκεται συρμάτινη σπείρα, με το επίπεδο της κάθετο στον άξονα του σωληνοειδούς. Η σπείρα έχει αντίσταση  $R_s=0,4\pi\Omega$  και διατομή  $S=2\text{cm}^2$ . Το σωληνοειδές, έχει  $n=1000$  σπείρες, μήκος  $\ell=0,2\text{m}$  και διαρρέεται από ρεύμα  $I_1=2\text{A}$ . Το ρεύμα του σωληνοειδούς μειώνεται με σταθερό ρυθμό σε  $I_2=1\text{A}$  σε

χρόνο  $\Delta t = 1 \text{ ms}$ . Να υπολογισθεί το επαγωγικό ρεύμα που διαρρέει τη σπείρα.

(1mA)

**14<sup>ο</sup>** Τετράγωνο συρμάτινο πλαίσιο έχει πλευρά  $a = 0,2 \text{ m}$  και διαρρέεται από ρεύμα  $I = 2 \text{ A}$ . Το πλαίσιο βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης  $B = 1 \text{ T}$ . Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου είναι κάθετες στο επίπεδο του πλαισίου. Να υπολογισθεί η συνολική δύναμη που ασκείται στο πλαίσιο από το πεδίο.

(0)

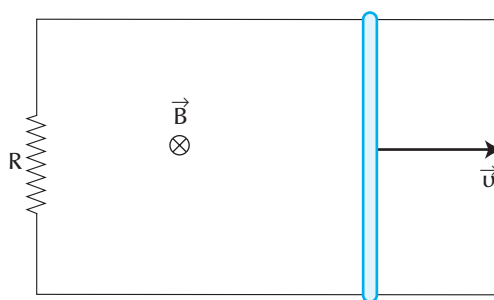
**15<sup>ο</sup>** Οριζόντιος ευθύγραμμος έχει μήκος  $\ell = 1 \text{ m}$  και διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I = 2 \text{ A}$ . Ο αγωγός ισορροπεί μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο του οποίου οι δυναμικές γραμμές είναι οριζόντιες και κάθετες στον αγωγό. Αν το βάρος του αγωγού είναι  $4 \text{ N}$ , να υπολογισθεί το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

(2T)

**16<sup>ο</sup>** Ευθύγραμμος αγωγός μήκους  $\ell = 0,5 \text{ m}$  κινείται μέσα σ' ομογενές μαγνητικό πεδίο με σταθερή ταχύτητα  $v = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  κάθετη στις δυναμικές γραμμές του πεδίου και τον αγωγό. Στον αγωγό εμφανίζεται επαγωγική τάση  $V = 0,4 \text{ V}$ . Να υπολογισθεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου.

(0,4T)

**17<sup>ο</sup>** Αγωγός μήκους  $\ell = 0,2 \text{ m}$  κινείται πάνω σε παράλληλους αγωγίμους οδηγούς Αχ και Βψ με ταχύτητα παράλληλη προς τους οδηγούς. Ο αγωγός είναι συνεχώς κάθετος στους οδηγούς, όπως στο σχήμα. Ομογενές μαγνητικό πεδίο που είναι κάθετο στο επίπεδο των αγωγών έχει ένταση  $B = 1 \text{ T}$ . Τα άκρα Α και Β των οδηγών συνδέονται με αντιστάτη  $R = 2 \Omega$ , οπότε ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα  $I = 0,2 \text{ A}$ . Να υπολογισθεί η ταχύτητα του αγωγού.



(2  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ )